

基于吸引度搜索的汽车滚装码头堆场车位分配优化

陈晓静¹, 胡志华^{*1}, 李功君²

(1. 上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306;

2. 上海海通国际汽车码头有限公司, 上海 200137)

摘要: 为加快滚装运输过程中汽车装卸滚装船舶的周转率, 促进滚装码头堆场车位资源的高效利用, 研究了滚装码头堆场车位分配问题. 按照成组集中分配原则, 以提高成组汽车停放集中度为目标, 建立了衡量成组汽车停放集中度的混合整数规划模型. 进而设计吸引度搜索算法对模型进行了求解. 与分支定界法相比, 吸引度搜索算法在高效求解规模化算例的同时可实现解的质量较优. 以上海海通汽车滚装码头堆场的车位实际布局及作业情况为背景, 验证了所提模型与算法的合理性及有效性, 拓展了汽车滚装码头堆场车位分配管理的理论研究.

关键词: 滚装码头堆场; 车位分配; 集中度; 混合整数规划; 吸引度搜索算法

中图分类号: U651

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201602002

0 引言

汽车滚装码头堆场车位分配作业是影响滚装运输作业过程中汽车装卸船舶周转率及堆场车位资源利用率的关键环节. 在实际滚装运输过程中, 部分水道和港湾因受潮汐影响, 使得滚装船舶必须在高潮前后才能航行和进出码头, 这就对汽车装卸滚装船舶的时效性具有较高的要求. 此外, 随着汽车滚装码头年吞吐量的增长, 加之汽车无法在堆场内堆垛存储的特性, 使得堆场车位资源趋紧的现象也日益凸显. 研究滚装码头堆场车位分配作业对加快汽车装卸过程的周转速度, 提高堆场车位资源利用率具有重要意义.

滚装运输业务量的增长促使堆场车位分配作业的工作量加大, 采用合理的算法可实现对数学模型规模化算例的高效求解. 与集装箱作业相比, 目前国内外关于汽车滚装作业的研究仍相对较少, 且多数属于早期文献. Mattfeld 等^[1]参考不来梅港的汽车调度机制, 针对库存控制及人力计划建立决策模型, 并将其分层处理, 设计启发式算法

加以求解; Fischer 等^[2]详细描述了汽车转运港口的多 Agent 系统, 探究了堆场车位的分配及调度计划, 并通过算例设计对随机生成的汽车储位问题加以检验; Mattfeld 等^[3]提出了基于启发式算法的堆场容量利用策略来平衡计划期内堆场车位的分配, 指出与遗传算法相比, 启发式算法能够在较短的时间内找到更好的解决方案; Cordeau 等^[4]从管理层、战略层的角度出发, 分析了汽车堆场中存在的管理问题, 采用自适应大规模邻域搜索算法对所建立的数学模型加以求解.

本文针对滚装码头堆场车位分配问题, 按照成组集中分配原则, 以提高堆场内成组汽车停放集中度为目标, 建立混合整数规划模型. 设计吸引度搜索算法, 分别采用分支定界法与吸引度搜索算法对多组实验场景进行求解, 验证其合理性及有效性.

1 问题描述

滚装码头作为汽车供销渠道, 为整车运输提供中转节点, 能够对车辆流通过程中的时间和空

收稿日期: 2015-09-03; 修回日期: 2016-01-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71471109); 国家自然科学基金青年基金资助项目(71101088); 教育部博士点基金资助项目(20113121120002); 上海市教委科研创新项目(14YZ100); 交通部应用基础研究项目(2015329810260); 上海市曙光计划项目(13SG48).

作者简介: 陈晓静(1990-), 女, 硕士生, E-mail: 990598065@qq.com; 胡志华^{*}(1977-), 男, 博士, 教授, E-mail: zhhu@shmtu.edu.cn.

间加以压缩,减少汽车物流中的阻碍^[5].其堆场作为汽车运输物流链中的重要节点,具有库存缓冲作用^[6],可吸收或缓解牛鞭效应,大幅度降低汽车物流成本,促进汽车物流利润实现最大化^[7].随着汽车滚装业务的发展,模块化布置方式的滚装码头堆场车位布局逐渐成为主流.图 1 给出了上海海通汽车滚装码头外四堆场的部分车位布局图,各模块的周边都设有通道,每个模块内的车位呈矩形集中布置.

经同一滚装船卸载的相同类型的汽车一般具备相同的出港时间要求,将其按型号划分成不同的组别,分别停放于一个辐射范围尽可能小,集中度尽可能大的停车区域内,可满足汽车堆存量及提取、停放便捷的双重要求,从而加快汽车装卸过程的周转速度,提高堆场车位资源利用率.基于

此,按照成组集中分配原则,建立数学规划模型,在使同一组别的汽车在堆场内集中停放的基础上,达到各组汽车同时集中停放的效果,优化堆场车位分配作业.

目前已有的文献中尚未发现以成组集中分配为指标的堆场车位分配问题的研究.而在实际堆场操作作业中,堆场车位的分配也大都依赖于调度人员的实际操作经验.堆场车位分配问题实质上是不同组别的车辆分配至堆场的各个车位,形成堆场车位分配计划.就模型建立方面,必然涉及以 0-1 变量来描述各个车辆在堆场中被分配的位置,从而形成混合整数规划模型.而在其他领域中大多数此类问题都具有 NP-hard 性质,因此,如何设计高效的算法对模型进行有效求解也是本文需要解决的难点.

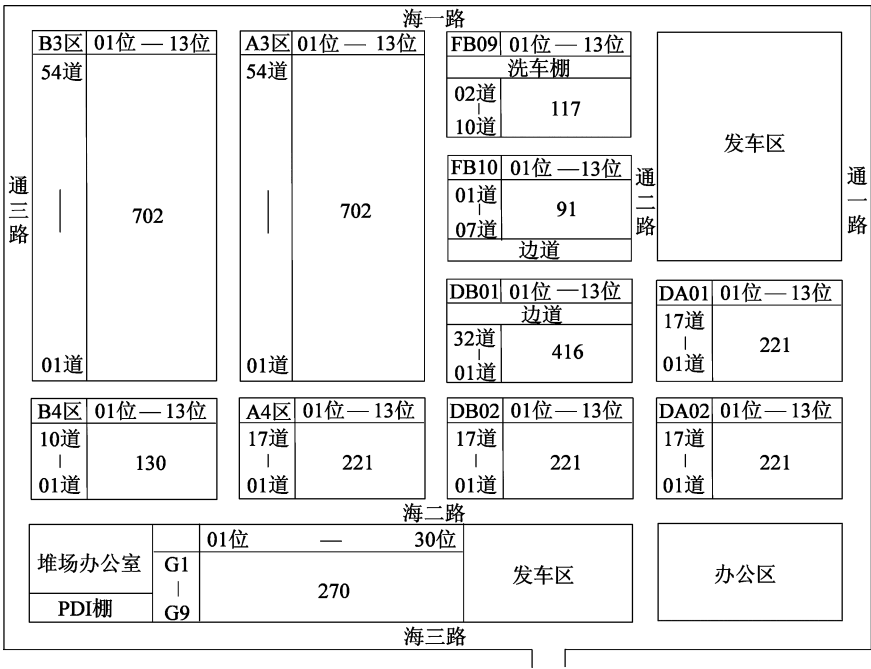


图 1 上海海通汽车滚装码头堆场部分车位布局图

Fig. 1 Layout of partial parking space in Shanghai Haitong automotive ro-ro yard

2 模型建立

- (1)集合说明
- ① $\{(r,c)\}$ 为每个停车位所对应的行列位置集合, $r=1,2,\cdots,R,c=1,2,\cdots,C$.
- ② A 为待作业的汽车集合,由 $a\in A$ 索引.
- ③ G 为相同型号的汽车组别集合,由 $g\in G$

- 索引.
- (2)参数说明
- ① $B_{g,a}$:0-1 参数,汽车 a 属于 g 组时取 1,否则为 0.
- ② $X_{r,c}^{\text{op}}$:0-1 参数,作业前堆场内第 r 行第 c 列的车位已被占用时取 1,否则为 0.

③ R, C : 分别表示汽车堆场的行数、列数.

④ $X_{r,c} \in G$: 堆场内第 r 行第 c 列的车位对应取值为已停放其内的汽车组别.

(3) 变量说明

① $x_{a,r,c}$: 0-1 变量, 汽车 a 停放于堆场内第 r 行第 c 列的车位时取 1, 否则为 0.

② $z_{g,r}^r$: 0-1 变量, 堆场内第 r 行区域内存在 g 组汽车时取 1, 否则为 0.

③ $z_{g,c}^c$: 0-1 变量, 堆场内第 c 列区域内存在 g 组汽车时取 1, 否则为 0.

④ y_{g,r_1}^{rl} : 0-1 变量, g 组内所有汽车均被停放于堆场内第 r_1 行(包括 r_1)的上方区域时取 1, 否则为 0, 其中 $r_1 \in R$.

⑤ y_{g,r_2}^{ru} : 0-1 变量, g 组内所有汽车均被停放于堆场内第 r_2 行(包括 r_2)的下方区域时取 1, 否则为 0, 其中 $r_2 \in R$.

⑥ y_{g,c_1}^{cl} : 0-1 变量, g 组内所有汽车均被停放于堆场内第 c_1 列(包括 c_1)的右方区域时取 1, 否则为 0, 其中 $c_1 \in C$.

⑦ y_{g,c_2}^{cu} : 0-1 变量, g 组内所有汽车均被停放于堆场内第 c_2 列(包括 c_2)的左方区域时取 1, 否则为 0, 其中 $c_2 \in C$.

⑧ y_{g,r_1,r_2}^{rlu} : 0-1 变量, g 组内所有汽车均被停放于堆场内行区域 $[r_1, r_2]$ 时取 1, 否则为 0.

⑨ y_{g,c_1,c_2}^{clu} : 0-1 变量, g 组内所有汽车均被停放于堆场内列区域 $[c_1, c_2]$ 时取 1, 否则为 0.

⑩ $y_{g,r_1,r_2,c_1,c_2}^{rlu}$: 0-1 变量, g 组内所有汽车均被停放于堆场内由行 $[r_1, r_2]$ 和列 $[c_1, c_2]$ 所构成的区域时取 1, 否则为 0.

图 2 给出了各变量间的逻辑关系.

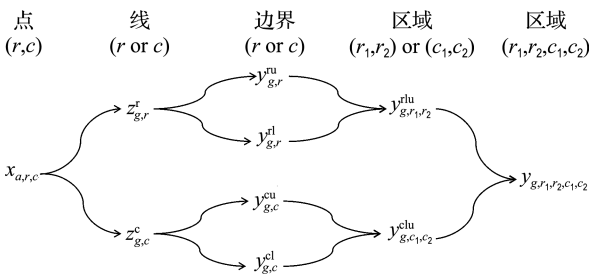


图 2 变量间逻辑关系

(4) 衡量每组汽车集中度的函数描述

$$f_g = \frac{(r_g^{\max} - r_g^{\min} + 1) \cdot (c_g^{\max} - c_g^{\min} + 1)}{\sum_a B_{g,a}} \quad (1)$$

$$(r_g^{\min}, r_g^{\max}) = (\min\{r | X_{r,c} = g\}, \max\{r | X_{r,c} = g\}) \quad (2)$$

$$(c_g^{\min}, c_g^{\max}) = (\min\{c | X_{r,c} = g\}, \max\{c | X_{r,c} = g\}) \quad (3)$$

(5) 成组集中策略下汽车滚装码头堆场车位分配模型

$$\min f = \sum_g \left(\sum_{r_1, r_2, c_1, c_2} (|r_1 - r_2| + 1) \cdot (|c_1 - c_2| + 1) \cdot y_{g,r_1,r_2,c_1,c_2} / \sum_a B_{g,a} \right) \quad (4)$$

约束条件为

$$\sum_{r,c} x_{a,r,c} = 1; \forall a \quad (5)$$

$$\sum_a x_{a,r,c} \leq 1; \forall r, c \quad (6)$$

$$\sum_a x_{a,r,c} = 0; \forall r, c, X_{r,c}^{\text{op}} = 1 \quad (7)$$

$$z_{g,r}^r \cdot C \geq \sum_{c,a,B_{g,a}=1} x_{a,r,c}; \forall g, r \quad (8)$$

$$z_{g,c}^c \cdot R \geq \sum_{r,a,B_{g,a}=1} x_{a,r,c}; \forall g, c \quad (9)$$

$$\sum_r y_{g,r}^{rl} = 1; \forall g \quad (10)$$

$$\sum_r y_{g,r}^{ru} = 1; \forall g \quad (11)$$

$$\sum_c y_{g,c}^{cl} = 1; \forall g \quad (12)$$

$$\sum_c y_{g,c}^{cu} = 1; \forall g \quad (13)$$

$$\sum_r (y_{g,r}^{rl} \cdot r) \geq z_{g,r_1}^r \cdot r_1; \forall g, r_1 \quad (14)$$

$$z_{g,r_1}^r \cdot r_1 \geq \sum_r (y_{g,r}^{ru} \cdot r) - R(1 - z_{g,r_1}^r); \forall g, r_1 \quad (15)$$

$$\sum_c (y_{g,c}^{cu} \cdot c) \geq z_{g,c_1}^c \cdot c_1; \forall g, c_1 \quad (16)$$

$$z_{g,c_1}^c \cdot c_1 \geq \sum_c (y_{g,c}^{cl} \cdot c) - C(1 - z_{g,c_1}^c); \forall g, c_1 \quad (17)$$

$$y_{g,r_1,r_2}^{rlu} \geq y_{g,r_1}^{rl} + y_{g,r_2}^{ru} - 1; \forall g, r_1, r_2 \quad (18)$$

$$y_{g,c_1,c_2}^{clu} \geq y_{g,c_1}^{cl} + y_{g,c_2}^{cu} - 1; \forall g, c_1, c_2 \quad (19)$$

$$y_{g,r_1,r_2,c_1,c_2}^{rlu} \geq y_{g,r_1,r_2}^{rlu} + y_{g,c_1,c_2}^{clu} - 1; \forall g, r_1, r_2, c_1, c_2 \quad (20)$$

式(1)为衡量每组汽车集中度的函数描述, f_g 越小表示集中度越大, 理想状态下 f_g 可达到的最

小值为1. 式(2)、(3)分别表示每组汽车所占用的车位对应的行(列)界限取值. 式(4)为衡量成组汽车集中度的数学模型, 由式(1)可知, 理想状态下 f 可达到的最小值与待作业汽车组数相等, 此时各组汽车的集中度和达到最大. 式(5)表示每辆汽车只能被停放于堆场的一个车位内. 式(6)表示堆场内每个车位最多只能停放一辆汽车. 式(7)表示作业前堆场内已被占用的车位不能再被分配汽车. 变量 $z_{g,r}^r$ 和 $z_{g,c}^c$ 分别定义了堆场中第 r 行和第 c 列是否存在 g 组内的汽车, 式(8)、(9)分别给出了 $z_{g,r}^r$ 、 $z_{g,c}^c$ 和变量 $x_{a,r,c}$ 之间的关联关系. 变量 y_{g,r_1}^{rl} 、 y_{g,r_1}^{ru} 、 y_{g,c_1}^{cl} 、 y_{g,c_1}^{cu} 分别定义了 g 组内所有汽车在堆场内被分配后所形成的上、下、左、右4条边界, 式(10)~(13)限制了边界的唯一性, 式(14)~(17)则给出了这些变量与 z_{g,r_1}^r 、 z_{g,c_1}^c 之间的关联关系. y_{g,r_1,r_2}^{rlu} 、 y_{g,c_1,c_2}^{clu} 、 y_{g,r_1,r_2,c_1,c_2} 为辅助变量, 其中 y_{g,r_1,r_2}^{rlu} 、 y_{g,c_1,c_2}^{clu} 分别定义了 g 组内所有汽车是否全部被分配在堆场行 $[r_1, r_2]$ 、列 $[c_1, c_2]$ 之间的区域, y_{g,r_1,r_2,c_1,c_2} 则定义了 g 组内所有汽车被停放后堆场车位封闭空间的形成, 这些辅助变量的定义确保了目标函数的线性化表示, 式(18)~(20)给出了它们之间的关联关系.

3 基于吸引力度搜索的启发式算法设计

3.1 堆场车位分配特征分析

根据汽车滚装码头堆场车位布局特点, 将堆场车位布置抽象为二维网络格局, 如图3所示. 每个格子代表一个车位, 每个车位坐标可由具体的行列数 (r, c) 表示, 并被赋予不同的状态. 其中-1代表作业前初始堆场内已被占据的车位, 不再参与分配作业; 0代表作业结束后, 堆场内未被分配的车位; 其余数字则分别代表了待作业的各组汽车组别. 根据本文模型中的目标函数, 堆场车位分配的目标在于尽可能使同组内的汽车在堆场中集聚放置. 因此, 对于任何一个可行解, 建立堆场车位分配吸引力度的概念去表征同组汽车在堆场内存放的局部集聚水平, 具体定义与计算方法可见3.2、3.3. 同时, 基于堆场中各位置的车位对不同组别汽车的吸引力度, 采用交换的策略以使得局部集聚水平不断得到提高. 通过遍历搜索, 最终使得堆场车位的分配布局达到次最优的状态.

3.2 吸引力度定义

(1) 符号说明

① $l_{(r,c)}^g$: 堆场内 (r, c) 位置车位对 g 组汽车的吸引力度水平.

② $L_{(R,C)}^G$: 堆场车位总吸引力度指标.

③ $\phi_{(r,c)}$: 堆场内 (r, c) 位置车位的邻域空间.

④ $\phi_{g,a}$: 0-1 参数, g 组中第 a 辆汽车的车位属于 $\phi_{(r,c)}$ 时取1, 否则为0.

⑤ s : 0-1 参数, 堆场内 (r, c) 位置的车位属于 $\phi_{(r,c)}$ 时取1, 否则为0.

(2) 吸引力度水平

$$l_{(r,c)}^g = \frac{\sum_a \phi_{g,a}}{\sum s} \quad (21)$$

$$\sum s = \begin{cases} 4; (r, c) \in \{(1, 1), (1, C), (R, 1), (R, C)\} \\ 6; (r, c) \in \{(1+i, 1), (1+i, C), (1, 1+j), \\ (R, 1+j) | 1 \leq i < R-1, \\ 1 \leq j < C-1, i \in \mathbf{N}, j \in \mathbf{N}\} \\ 9; (r, c) \in \{(1+i, 1+j) | 1 \leq i < R-1, \\ 1 \leq j < C-1, i \in \mathbf{N}, j \in \mathbf{N}\} \end{cases} \quad (22)$$

(3) 总吸引力度指标

$$L_{(R,C)}^G = \sum_{(r,c)} \max \{l_{(r,c)}^g | g \in G\} \quad (23)$$

图3给出了4行6列的堆场内(1,1)、(2,6)、(3,4)3个位置车位对各组汽车吸引力度水平的计算示例.

3.3 算法步骤

Step 1 (初始化) 将待作业汽车随机存放到堆场内未被占据的车位中, 得到堆场车位分配方案 P .

Step 2 在 P 的基础上, 计算堆场各车位 (r, c) 对 g 组汽车的吸引力度水平 $l_{(r,c)}^g$, 构建已检测吸引力度水平集合 $\Omega (\Omega = \emptyset)$.

Step 3 搜索最大吸引力度水平 $l_{(r,c)}^g$ ($l_{(r,c)}^g \notin \Omega$), 判断其对应的堆场车位 (r, c) 是否已存放 g 组汽车. 若是, 则 $l_{(r,c)}^g$ 被添加至 Ω , 进入Step 5, 否则进入Step 4.

Step 4 将堆场内的所有 g 组汽车, 与车位 (r, c) 位置的汽车分别进行逐一交换, 记录每次交换所得 P 及其对应的 f 值, 并计算 $L_{(R,C)}^G$, 基于 $L_{(R,C)}^G$ 获得最佳交换策略, 判断最佳交换策略下 $L_{(R,C)}^G$ 对应的 P 是否被改善, 若是则更新方案 P ,

进入 Step 2, 否则将吸引度水平 $l_{(r,c)}^g$ 添加至 Ω .

Step 5 判断是否所有的 $l_{(r,c)}^g$ 已被检测完, 若是, 则输出最小值 f 对应的堆场车位分配方案

P , 否则返回 Step 3.

图 4 给出了 4 行 6 列的堆场内(3,4)位置车位依据吸引度水平对各组汽车进行搜索交换的示例.

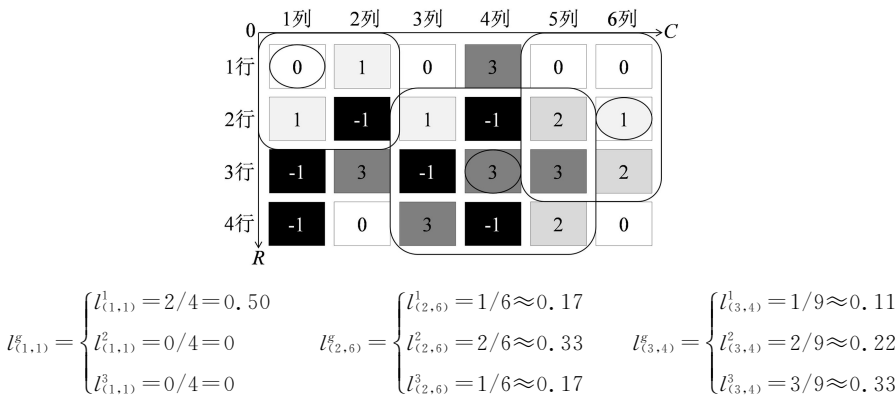


图 3 吸引度水平计算示例

Fig. 3 Calculating demonstrations of attraction degree level

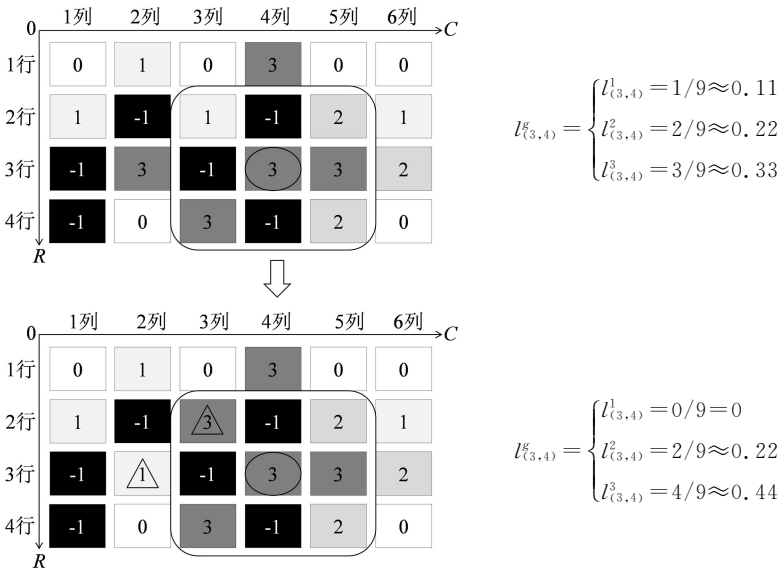


图 4 基于吸引度水平的滚装码头堆场汽车搜索交换示例

Fig. 4 A demonstration of vehicles search and swap in ro-ro yard based on attraction degree level

4 数值实验设计与分析

4.1 数值实验设计

为了验证成组集中策略下汽车滚装码头堆场车位分配模型的合理性及吸引度搜索算法的可行性, 本文设计了 5 组实验场景, 每组场景内设 6 个算例(表 1). 通过调整已占车位坐标, 确保依次改变: 待作业汽车组数、每组汽车数目, 初始堆场车位布局、已占车位率、已占车位分散度. 其中已占车位率为 $\sum X_{r,c}^{op}/(R \times C)$, 已占车位分散度为

$[(r_{-1}^{\max} - r_{-1}^{\min} + 1)(c_{-1}^{\max} - c_{-1}^{\min} + 1)]/(R \times C)$, $r_{-1}^{\max}(c_{-1}^{\max})$ 与 $r_{-1}^{\min}(c_{-1}^{\min})$ 分别表示作业前堆场内已被占据的车位所在行(列)坐标的最大值与最小值.

4.2 实验结果分析

采用分支定界法与吸引度搜索算法求解上述数值实验, 其中分支定界法通过 CPLEX 来实现. 图 5、6 分别给出了采用吸引度搜索算法求解实验场景 1 算例 3 及实验场景 3 算例 2 所得到的滚装

表 1 数值实验设计

Tab. 1 Numerical experiments design

实验		待作业汽车属性		初始堆场属性			
场景	算例	汽车组数	每组汽车数目	布局(行,列)	已占车位率	已占车位分散度	已占车位坐标
1	1	1	12	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
	2	2	5/7	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
	3	3	4/2/6	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
	4	4	3/2/4/3	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
	5	5	2/4/1/3/2	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
	6	6	1/2/3/2/1/3	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
2	1	3	2/2/3	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
	2	3	4/2/2	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
	3	3	4/2/3	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
	4	3	4/3/3	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
	5	3	4/2/3	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
	6	3	4/3/5	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
3	1	3	4/3/5	(4,4)	0.25	0.50	(1,3)(1,4)(2,1)(2,2)
	2	3	4/3/5	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
	3	3	4/3/5	(4,6)	0.25	0.50	(2,2)(2,4)(3,1)(3,3)(4,1)(4,4)
	4	3	4/3/5	(4,7)	0.25	0.50	(2,2)(2,4)(2,6)(2,7)(3,1)(3,3)(3,6)
	5	3	4/3/5	(4,8)	0.25	0.50	(1,3)(1,5)(2,2)(2,4)(3,3)(3,5)(4,2)(4,5)
	6	3	4/3/5	(4,9)	0.25	0.50	(2,2)(2,4)(2,6)(3,3)(3,5)(3,7)(4,2)(4,4)(4,6)
4	1	3	4/3/5	(4,5)	0.10	0.50	(2,1)(3,5)
	2	3	4/3/5	(4,5)	0.15	0.50	(2,1)(3,3)(3,5)
	3	3	4/3/5	(4,5)	0.20	0.50	(2,1)(2,4)(3,3)(3,5)
	4	3	4/3/5	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
	5	3	4/3/5	(4,5)	0.30	0.50	(2,1)(2,3)(2,4)(3,2)(3,3)(3,5)
	6	3	4/3/5	(4,5)	0.35	0.50	(2,1)(2,3)(2,4)(2,5)(3,2)(3,3)(3,5)
5	1	3	4/3/5	(4,5)	0.25	0.30	(2,2)(2,3)(2,4)(3,2)(3,3)
	2	3	4/3/5	(4,5)	0.25	0.40	(2,2)(2,3)(2,5)(3,2)(3,3)
	3	3	4/3/5	(4,5)	0.25	0.45	(2,2)(2,3)(3,2)(3,4)(4,3)
	4	3	4/3/5	(4,5)	0.25	0.50	(2,2)(2,5)(3,1)(3,3)(3,5)
	5	3	4/3/5	(4,5)	0.25	0.60	(2,2)(2,5)(3,2)(3,4)(4,3)
	6	3	4/3/5	(4,5)	0.25	0.80	(1,2)(2,5)(3,2)(3,4)(4,3)



图 5 实验场景 1 算例 3 滚装码头堆场车位分配方案

Fig. 5 Distribution scheme of parking space in ro-ro yard based on the third example in the first experiment scene



图 6 实验场景 3 算例 2 滚装码头堆场车位分配方案

Fig. 6 Distribution scheme of parking space in ro-ro yard based on the second example in the third experiment scene

码头堆场车位分配方案,与分支定界法计算结果(表 2)作比,前者获得了最优解,误差为 0,后者误差为 0.03. 从计算结果及计算时间来看,随着待作业汽车组数、待作业汽车总数的增加,以及堆场布局规模的扩大,吸引度搜索算法的计算时间远远小于分支定界法. 且在堆场规模依次递增的实验场景 3 中,算例 5、6 计算时间长达 72 h,分支定界法仍未得到最优解. 实验结果证明了吸引度搜索算法在高效求解规模化算例的同时可实现解的

质量较优.

5 实际应用

根据海通码头外四堆场布局及汽车分配作业的实际情况,仿照表 1 实验场景 1 设计应用算例(表 3). 如图 1 中 B4 区所示,选取 13 行 10 列的堆场布局,通过调整已占车位坐标,控制已占车位率为 0.3,已占车位分散度为 0.5,运用吸引度搜索算法求解. 从计算结果(图 7)可以看出,在每组

表 2 分支定界法与吸引度搜索算法结果对比

Tab. 2 Results comparison between branch and bound method and attraction degree search algorithm

实验		分支定界法		吸引度搜索算法		
场景	算例	f	t_{CPU}/s	f	t_{CPU}/s	误差(偏差)
1	1	1.3	0.803	1.3	0.001	0
	2	2.1	4.823	2.6	0.002	0.24
	3	3.3	1 332.850	3.3	0.005	0
	4	4.0	11 930.600	4.7	0.013	0.18
	5	5.0	32 808.200	5.0	0.016	0
	6	6.0	21 213.600	6.7	0.006	0.12
2	1	3.0	45.601	3.0	0.008	0
	2	3.0	309.760	3.0	0.005	0
	3	3.0	457.631	3.3	0.007	0.10
	4	3.0	927.217	3.7	0.011	0.23
	5	3.3	1 438.730	3.8	0.007	0.15
	6	3.2	2 236.720	3.5	0.008	0.09
3	1	3.6	79.206	4.2	0.003	0.17
	2	3.2	2 261.050	3.3	0.014	0.03
	3	3.0	23 359.900	3.7	0.016	0.23
	4	3.0	126 076.000	3.2	0.022	0.07
	5	3.2*	259 200.000	3.7	0.019	1.00*
	6	3.2*	259 200.000	3.5	0.023	1.00*
4	1	3.0	11975.600	3.2	0.027	0.07
	2	3.0	5 255.080	3.2	0.013	0.07
	3	3.0	2 303.440	3.5	0.006	0.17
	4	3.2	2 243.390	3.5	0.003	0.09
	5	3.5	637.988	3.8	0.003	0.09
	6	3.5	216.943	4.6	0.002	0.31
5	1	3.0	462.275	3.5	0.009	0.17
	2	3.0	568.944	3.7	0.003	0.23
	3	3.2	943.406	3.6	0.006	0.13
	4	3.2	2 242.650	3.5	0.007	0.09
	5	3.5	1 847.300	3.9	0.006	0.11
	6	3.5	2 042.910	3.9	0.006	0.11

注:1)分支定界法对应的 f 中上标*值为上界值,其下界值为 0,可行解与最优解之间的偏差为 1,其余 f 均为最优解;
2)误差计算公式: $(b-a)/a$,其中 a 代表分支定界法对应的 f 值, b 代表吸引度搜索算法对应的 f 值;
3)偏差计算公式(上标*值): $(b-a)/b$,其中 a 代表分支定界法对应的下界值, b 代表吸引度搜索算法对应的 f 值

实验中,随着待作业汽车组数的增加, f 值逐渐增大,这与成组集中分配策略下滚装码头堆场车位分配模型表征意义相符.此外,待作业汽车组数的增加导致堆场内每个车位具备的吸引度水平种类

增多,堆场内不同组别的汽车搜索交换过程变复杂,从而采用吸引度搜索算法求解所需要的 CPU 计算时间也依次递增(图 8).

表 3 实际应用算例设计

Tab. 3 Examples of practical application design

应用实验		待作业汽车属性		应用实验		待作业汽车属性	
实验	序号	汽车组数	每组汽车数目	实验	序号	汽车组数	每组汽车数目
1	1	1	60	3	1	1	80
	2	2	27/33		2	2	33/37
	3	3	13/20/27		3	3	20/27/33
	4	4	10/13/17/20		4	4	12/20/21/27
	5	5	8/10/11/12/13		5	5	10/17/20/21/12
	6	6	6/8/10/11/12/13		6	6	8/10/12/13/17/20
3	1	1	70	4	1	1	90
	2	2	33/37		2	2	43/47
	3	3	17/20/33		3	3	20/27/43
	4	4	15/17/18/20		4	4	20/21/22/27
	5	5	7/13/15/17/18		5	5	11/16/20/21/22
	6	6	7/8/10/13/15/17		6	6	9/11/13/16/20/21

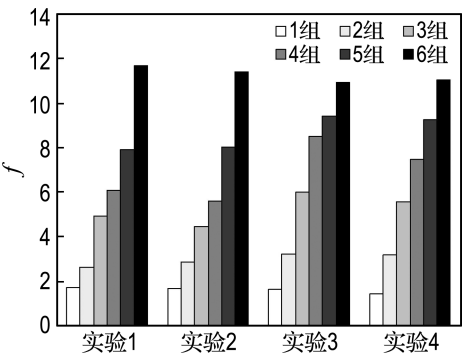


图 7 计算结果统计

Fig. 7 Statistics of computation result

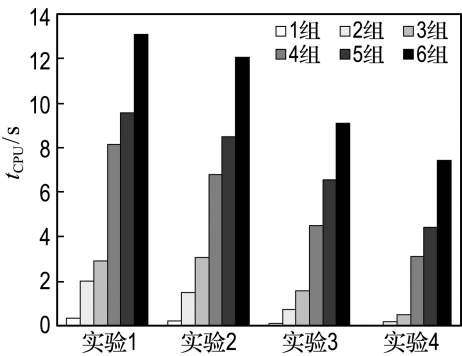


图 8 计算时间统计

Fig. 8 Statistics of computation time

6 结 语

本文针对滚装码头堆场车位分配问题,按照成组集中分配原则,建立了衡量成组汽车停放集中度的混合整数规划模型,并设计吸引度搜索算法求解.与分支定界法对比的数值实验结果表明,吸引度搜索算法在解的质量上趋近于分支定界法,且运算时间远小于分支定界法,能够高效处理大规模算例.根据海通码头外四堆场的实际布局及作业情况设计算例,进一步分析了研究成果的应用情况.验证了堆场车位分配模型的合理性及吸引度搜索算法的有效性,拓展了汽车滚装码头堆场车位分配管理的理论研究,在优化车位分配的基础上促进了滚装运输作业的高效运行.

参考文献：

[1] Mattfeld D C, Kopfer H. Terminal operations management in vehicle transshipment [J]. Transportation Research Part A:Policy and Practice. 2003, 37(5):435-452.

[2] Fischer T, Gehring H. Planning vehicle

- transshipment in a seaport automobile terminal using a multi-agent system [J]. **European Journal of Operational Research**, 2005, **166**(3):726-740.
- [3] Mattfeld D C, Bierwirth C. An efficient genetic algorithm for job shop scheduling with tardiness objectives [J]. **European Journal of Operational Research**, 2004, **155**(3):616-630.
- [4] Cordeau J-F, Laporte G, Moccia L, *et al.* Optimizing yard assignment in an automotive transshipment terminal [J]. **European Journal of Operational Research**, 2011, **215**(1):149-160.
- [5] Dias J C Q, Calado J M F, Mendonca M C. The role of European 《ro-ro》 port terminals in the automotive supply chain management [J]. **Journal of Transport Geography**, 2010, **18**(1):116-124.
- [6] Mendonca M C, Dias J C Q. 'Postponement' in the logistical systems of new automobiles marketed in Portugal;the brands and quality [J]. **Total Quality Management & Business Excellence**, 2007, **18**(6):681-696.
- [7] Chen I J, Paulraj A. Understanding supply chain management: Critical research and a theoretical framework [J]. **International Journal of Production Research**, 2004, **42**(1):131-163.

Optimization for parking space distribution in automotive ro-ro yard based on attraction degree search

CHEN Xiao-jing¹, HU Zhi-hua^{*1}, LI Gong-jun²

(1. Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Haitong International Automotive Terminal Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: In order to speed up the turnover ratio when automobiles roll up and roll down ro-ro ships in the process of ro-ro transportation and promote the utilization of parking space in ro-ro yard efficiently, the problem of parking space distribution in ro-ro yard is explored. According to the principle of centralized allocation of gathered groups, focusing on improving concentration degree of batch automobiles, a mixed-integer programming model is constructed to measure concentration degree of batch automobiles. Then attraction degree search algorithm is designed to solve the model. Compared with branch and bound method, the attraction degree search algorithm can deal with large-scale numerical examples efficiently and get satisfied solutions at the same time. Using the layout of parking space and operation conditions in Shanghai Haitong automotive ro-ro yard as research background, the proposed model and algorithm are proved to be reasonable and valid, which expand the theoretical research of parking space distribution management in automotive ro-ro yard.

Key words: ro-ro yard; parking space distribution; concentration degree; mixed-integer programming; attraction degree search algorithm